

языке C++ и обладает возможностями для автоматизации расчетов и проведения численного эксперимента при расчетах ползучести и длительной прочности пластинчатых элементов конструкций.

**Список литературы:** 1. *Работнов Ю.Н.* Ползучесть элементов конструкций. – М.: Наука, 1966. – 752 с. 2. *Рвачев В.Л.* Теория R-функций и некоторые ее приложения. – К.: Наук. думка, 1982. – 552 с. 3. *Склепус С.Н.* Вариационно-структурный метод в задачах ползучести пологих оболочек сложной формы // Доповіді НАН України. 2001. №9. С. 73-78. 4. *Altenbach H., Morachkovsky O., Naumenko K., Sychov A.* Geometrically nonlinear bending of thin-walled shells and plates under creep-damage conditions // Archive of Applied Mechanics. 1997. 67. p. 339–352.

*Поступила в редакцию 04.04.02*

УДК 539.3

**Н.А. ТКАЧУК**, канд.техн.наук

## **РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ СЛОЖНЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

Запропоновано основи розрахунково-експериментального методу для розрахунку напружено-деформованого стану елементів складних механічних систем. Описано структурну та функціональну схеми досліджень із застосуванням методу скінчених елементів та спекл-голографічної інтерферометрії.

Рассмотрим механический объект в пространстве с декартовыми координатами, занимающий область  $\Omega$  с границей  $S = S_u \cup S_F \cup S_c$ , где  $S_u$  – часть границы с заданными перемещениями,  $S_F$  – часть границы с заданными нагрузками,  $S_c$  – часть границы с заданными условиями контакта. Пусть задано также некоторое механическое пространственное, температурное или иное воздействие на тело. Напряженно-деформированное состояние описывается в операторном виде

$$L(u, p) = 0, \quad (1)$$

где  $L$  и  $u$  – оператор краевой задачи и переменная состояния;

$p$  – массив параметров, включающий в зависимости от типа задачи геометрические параметры, характеристики материала, параметры силовой, термической нагрузки и т.д.

Для решения данной задачи используется расчетный метод конечных элементов и экспериментальный метод спекл-голографической интерферометрии [1,2]. Пусть в операторном виде численная модель принимает вид:

$$L_N(u_N, p_N) = 0, \quad (2)$$

где индекс  $N$  соответствует численным параметрам теоретической модели (1).

Пусть аналогично в операторном виде экспериментальная модель принимает вид:

$$L_E(u_E, p_E) = 0, \quad (3)$$

где индекс  $E$  соответствует параметрам экспериментальной модели (1).

Предположим, что известны решения задачи (2), а также результаты эксперимента (3).

Вводятся дополнительные условия:

- Экспериментальная модель достаточно адекватно описывает действительную картину поведения реального объекта;
- Операторное уравнение (1) достаточно точно описывает поведение реального объекта;
- Переход от теоретической модели (1) к численной (2) осуществлен достаточно корректно.

Тогда оценка достоверности численных результатов может быть получена при помощи сравнения с результатами экспериментальных исследований.

Введем меру оценки различия результатов численных и экспериментальных исследований:

$$I = I(u_N, u_E). \quad (4)$$

Естественно, при идеальном выборе численной модели, условий эксперимента и теоретической модели явления

$$I \equiv 0. \quad (5)$$

Однако в реальных условиях  $I \neq 0$ , и задача получения достоверных численных моделей может быть сформулирована как задача определения  $p_N^*$ , минимизирующих  $I$ :

$$p_N^* = \arg \min I(u_N, u_E, p_N) \quad (6)$$

Ценность решения данной задачи состоит в том, что полученный набор параметров  $p_N^*$  может быть использован при численном анализе целого ряда *аналогичных* конструкций без проведения дорогостоящих экспериментов.

Отдельной задачей является определение конкретного вида функционала  $I$ . Это может быть:

- эвклидова норма

$$I_1 = \int_{(s)} (\bar{u}_N - \bar{u}_E)^2 ds, \quad (7)$$

- аналогичная величина для выбранной части поверхности

$$I_2 = \int_{(s^p)} (\bar{u}_N - \bar{u}_E)^2 ds, \quad (8)$$

- аналогичная величина для некоторой линии  $l \in S$ :

$$I_3 = \int_{(l)} (\bar{u}_N - \bar{u}_E)^2 dl, \quad (9)$$

- аналогичная величина для некоторой точки  $P_j \in S$ :

$$I_4 = (\bar{u}_N - \bar{u}_E)^2. \quad (10)$$

Величины (7)-(10) могут в некоторой комбинации с весовыми коэффициентами  $\gamma$  образовывать комплексный функционал  $I^C$ :

$$I^C = \sum_k \gamma_k \sum_{j,s,t} \gamma_{j,s,t} I_k(S, S_j^p, l_s, p_t). \quad (11)$$

Кроме того, в качестве функционала  $I$  может быть принята некоторая энергетическая норма, норма абсолютной разности или любая другая норма, диктуемая спецификой исследуемого объекта и спецификой задачи.

На параметры  $p_N$  в общем случае могут быть наложены дополнительные ограничения

$$G(p_N) \geq 0, \quad (12)$$

которые описывают в пространстве данных параметров  $V_{p_N}$  некоторую область  $V_{p_N}^0$ . Тогда исходная задача сводится к проблеме поиска минимума функционала  $I$  на множестве  $V_{p_N}^0$ :

$$p_N^* = \arg \min I(u_N, u_E, p_N), p_N \in V_{p_N}^0. \quad (13)$$

Идея параметризации предполагает при реализации предлагаемого расчетно-экспериментального метода функциональную схему, приведенную на рис. 1. Основной функциональной особенностью предложенного подхода является механизм *обратной связи* в цепи расчет-эксперимент, обеспечивающий *параллельное, взаимосогласованное и взаимовлияющее* изменение плана расчетно-экспериментальных исследований в ходе *самокорректирующегося* процесса.

Естественно, что в ходе решения задач (6) или (13) необходимо производить варьирование параметров  $p_N$  и многократно решать задачу (2).

В связи с этим необходимо решить следующие проблемы:

- выбор инструмента для численного определения напряженно-деформированного состояния механических объектов;
- выбор метода единого формата представления результатов численных и экспериментальных исследований.

Как вариант, в качестве инструмента для численного определения напряженно-деформированного состояния механических объектов предполагается использовать CAD Pro/ENGINEER и CAE ANSYS, а в качестве единого формата данных - формат ANSYS.

Общая схема решения задачи при этом приобретает вид, приведенный на рис. 2.

Предложенная схема, которая составляет структуру проведения исследований напряженно-деформированного состояния элементов сложных механических систем, иллюстрирует взаимосвязь расчетных и экспериментальных этапов, а также пути и формы обмена информацией. Несомненными преимуществами

ществами предложенного подхода является универсальность по отношению к типу исходной информации, типам применяемых инструментов (CAD/CAE), а также типу исследуемых задач (статическая прочность, частотный анализ, переходные процессы). Однако в каждом конкретном случае меняется структура оценочного функционала (4) и соответствующие настройки интерфейсных программ для преобразования данных.

Описанный подход актуален как при исследовании уникальных объектов, так и объектов, имеющих аналоги (ярким примером может быть исследование представителя гаммы конструкций приспособлений некоторого типа-размера с распространением полученных результатов на всю гамму).

Как указывалось выше, самостоятельную ценность имеют не только и не столько экспериментально проверенные результаты численных исследований, но и рационально сбалансированная достоверная численная модель объекта.

Конечно-элементная модель сложного объекта может иметь также и большую коммерческую ценность. Кроме того, предложенная методика может быть положена в основу иерархической базы данных и знаний о том или ином классе объектов, причем объектами сравнения могут быть множества баз данных (как численных, так и экспериментальных). Здесь также могут быть введены соответствующие критерии улучшения модели, причем для сравнения могут быть взяты модели, полученные независимо из различных источников и в разное время.

Окончательным результатом исследования является достоверная численная модель для определения напряженно-деформированного состояния тех или иных объектов или классов объектов.

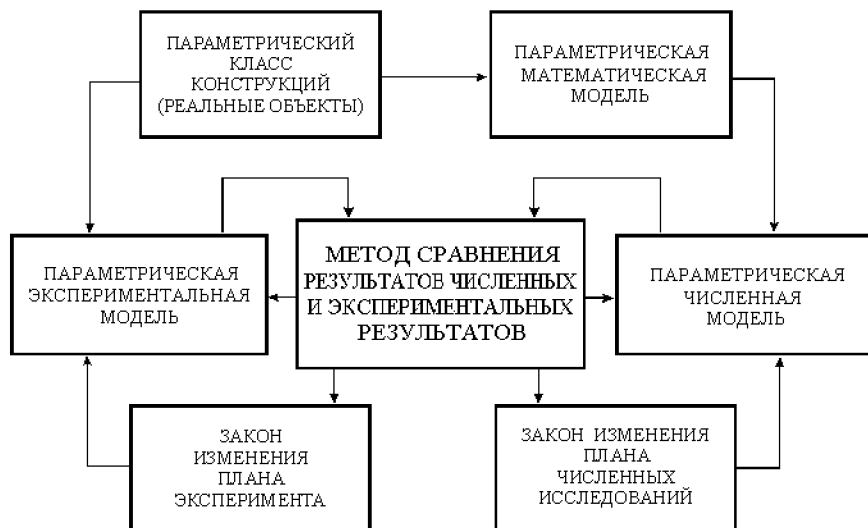


Рис. 1. Структурно-функциональная схема расчетно-экспериментального метода

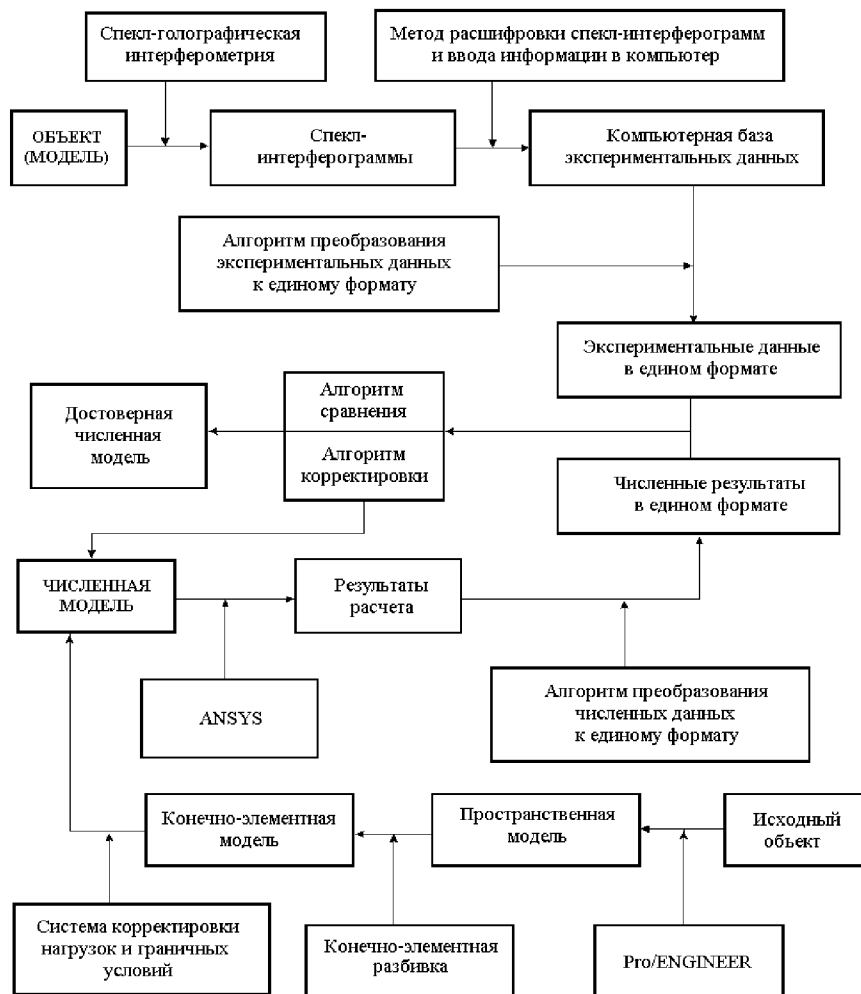


Рис. 2. Общая схема расчетно-экспериментального метода на базе метода конечных элементов и спекл-голографической интерферометрии

При решении поставленной задачи при помощи предложенного расчетно-экспериментального метода ее можно обратить: пусть имеется достаточно точный инструмент исследования численных моделей, однако существует сомнение в применимости тех или иных математических моделей. То же – на любом участке цепи “математическая модель – численная модель – экспериментальная модель с измерительной аппаратурой”. В этом случае можно: 1) определить структуру и параметры той или иной модели (узкая задача); 2) определить в пространстве варьируемых параметров области, в пределах кото-

рых справедливы различные модели (широкая задача).

Формально в процессе исследований можно “уравнять в правах” все типы моделей, выделив группу уточняющих моделей и уточняемую модель. Кроме того, возможна и постановка “смешанной” задачи, т.е. задачи, в которой объектом уточнения является множество параметров, представляющее совокупность параметров из различных типов моделей. В этом случае вместо уточняющих и уточняемых моделей (и их параметров) в качестве основных объектов выступают соответственно подмножества параметров. Более того, состав этих множеств может изменяться за счет “миграции” параметров из группы в группу.

Предлагаемый метод изучения напряженно-деформированного состояния элементов сложных механических систем допускает глубокую степень формализации, однако большую роль в процессе исследований играет сам исследователь (или группа исследователей). В его компетенции – определение, изменение (удаление, пополнение) множества параметров, а также границ их изменения, разрешение коллизий, а также текущий контроль за процессом. Это обусловлено, во-первых, невозможностью на данном этапе полной формализации предлагаемой технологии исследований, во-вторых, необходимостью исключения тупиковых ситуаций и, в-третьих, очень высокой стоимостью ошибки (например, неоправданное усложнение плана экспериментальных исследований может повлечь такой рост общей стоимости всего комплекса исследований группы или класса конструкций, что он превысит стоимость аналогичных работ по традиционному способу).

Предложенные схемы расчетно-экспериментальных исследований позволяют оперативно проводить *серии* исследований групп конструкций, причем наиболее трудоемкая часть, а именно экспериментальная, проводится в минимально возможном объеме.

Используя преимущества INTERNET-технологий, исследования с применением предложенного расчетно-экспериментального метода можно, во-первых, распараллелить (т.е. одновременно выполнять отдельные этапы и подэтапы силами различных исследователей и исследовательских групп), а, во-вторых, разнести географически и хронологически. При организации сервера баз данных возможна также определенная организация хранения результатов исследований, позволяющая создавать банки данных по тем или иным группам конструкций. Придав таким базам данных свойства открытости и доступности, на определенной стадии их развития можно создавать “верификационные эталоны” для различных видов механических систем. Это в свою очередь позволяет создавать экспертные системы, само существование которых избавило бы от необходимости проводить большую часть экспериментальных исследований, поскольку перед предстоящим циклом исследований всегда была бы возможность обратиться к соответствующей (и все время пополняемой) базе знаний. Чем полнее и совершеннее эта база, тем больше вероятность получить необходимые рекомендации для построения достоверной численной

модели исследуемой механической системы.

Естественно, что при проведении расчетно-экспериментальных исследований в предложенной постановке одним из требований является некоторая степень *избыточности* экспериментальных данных, которая позволяет повысить степень точности и полноты создаваемой численной модели.

Таким образом, предложенный подход позволяет устранить существующие недостатки традиционной технологии расчетных и экспериментальных исследований напряженно-деформированного состояния элементов сложных механических систем, а именно формализовать процесс сравнения, автоматизировать процесс улучшения численной модели и повысить оперативность всего цикла исследований.

**Список литературы:** 1. *Ткачук Н.А.* Интенсивная схема экспериментальных исследований элементов технологических систем. // Динамика и прочность машин. 1998. Вып. 56. С. 175-181. 2. *Капустин А.А., Ткачук Н.А.* Расчетно-экспериментальный метод исследования деформаций элементов механических систем. // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. 1999. Вып. 53. С. 148-155.

*Поступила в редколлегию 16.04.02*

УДК 622.691.4 : 536.2

**А.В. ЯКУНИН**, канд.техн.наук; **В.А. ФАТАУШКИН**.

### **УПРОЩЕННАЯ МОДЕЛЬ ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА УПРАВЛЯЕМОГО ПОТОКА ГАЗА В МАГИСТРАЛЬНОМ ТРУБОПРОВОДЕ ПОДЗЕМНОЙ ПРОКЛАДКИ**

Розглядаються слабо нестационарні неізотермічні керовані процеси транспорту газу, що дозволяє використати ряд спрощуючих припущень про характер течії. Пропонується скінченне аналітичне зображення розподілу температури газу вздовж трубопроводу, одержане на основі методу малого параметра і декомпозиції крайової задачі в рамках операційного числення.

**Введение.** Создание и внедрение информационных ресурсосберегающих и экологически безопасных технологий магистрального транспорта газа [1-3] требуют модернизации известных и разработки новых моделей и методов описания производственных процессов. Оперирование со знаниями об объектах управления все чаще организуется в режиме реального времени, хотя существенными ограничивающими факторами остаются уровень производительности вычислительных систем и многообразие возможных технологических ситуаций. Поэтому актуальной проблемой является как учет возможно большего числа факторов для детального описания изучаемых процессов, так и создание упрощенных моделей для оценочных расчетов [1].